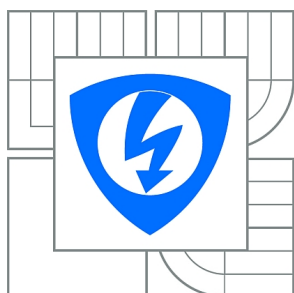




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ALTERNATIVNÍ SOFTWARE PRO ŘÍZENÍ SPECIALIZOVANÝCH TEPLITNÍCH KOMOR S UŽIVATELSKÝM ROZHRANÍM

ALTERNATIVE CONTROL SW FOR DEDICATED THERMAL PERFORMANCE CHAMBERS WITH
CUSTOMIZED UI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ŽLEBEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. PAVEL VÁCLAVEK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Jan Žlebek

ID: 154917

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

**Alternativní software pro řízení specializovaných teplotních komor s
uživatelským rozhraním**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh řídicího SW pro teplotní komory.

1. Seznamte se s problematikou testování řídicích algoritmů během vývoje termostatů a analyzujte stávající laboratorní vybavení (specializované teplotní komory), jak po stránce HW řešení, tak zejména řídicího a aplikačního SW.
2. Navrhněte vlastní řídicí a aplikační SW pro teplotní komory.
3. Ověřte funkčnost navrženého řešení.
4. Proveďte posouzení dynamiky a přesnosti řízení teploty při využití nově navrženého SW.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Blaha, P., Vavřín, P.: Řízení a regulace, ET VUT Brno, 2009
- [2] Honeywell, testovací procedura "Thermostat Thermal Performance", vzorové testovací reporty
- [3] Honeywell, Design Analysis Test Report EXM48829 (validace stávajících teplotních komor s použitím "golden samples")

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 25.5.2015

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce: Petr Dohnal, Honeywell
Jiří Kraus, Honeywell

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se věnuje simulačním termálním komorám, jejich SW a HW a vylepšení SW podle požadavků. Dále je také nastíněna problematika testování, která s prací souvisí. Zde užívané termální komory jsou určeny k provádění simulačních testovacích procedur pro termostaty a podobná zařízení pro snímání teploty a regulaci teploty. Návrh a realizace nového SW jsou objasněny v pozdějších kapitolách práce, stejně jako posouzení funkčnosti a výsledné dynamiky a přesnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

termostat, senzor, teplota, teplotní komora, simulace, topení, větrání, klimatizace, uzavřená smyčka

ABSTRACT

This thesis is oriented on simulating thermal chambers, their SW and HW and improving SW to meet specifications. Testing problematics connected with this thesis is briefly mentioned also. Thermal chambers used here are dedicated to run simulating test procedures for thermostats and similar devices designed to sense temperature and regulate it. Design and realisation of new SW are clarified in latter chapters of this thesis, as well as evaluating functionality and resulting dynamics and accuracy.

KEYWORDS

thermostat, sensor, temperature, thermal chamber, simulation, heating, ventilation, air conditioning, closed loop

ŽLEBEK, Jan *Alternativní software pro řízení specializovaných teplotních komor s uživatelským rozhraním*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2015. 43 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Alternativní software pro řízení specializovaných teplotních komor s uživatelským rozhraním“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího a konzultantů bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval panu prof. Ing. Pavlu Václavkovi, Ph.D. za vedení při tvorbě práce a za cenné rady, které mi dopomohly ke snadnějšímu zdolání úskalí tvořených řešeným problémem. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Honeywell, spol. s r o. - HTS CZ a styčným zaměstnancům: Ing. Petru Dohnalovi, Ing. Jiřímu Krausovi a Ing. Pavlu Kalinovi za možnost podílet se na tomto projektu a za pomoc při konečné realizaci úprav termálních komor.

Brno

.....

podpis autora

OBSAH

Úvod	9
1 Seznámení s testováním	10
1.1 Testované výrobky	10
1.2 Zdroje odpadního tepla	10
1.3 Testovací procedury	11
1.3.1 Držení konstantní teploty	11
1.3.2 Skok teploty	11
1.3.3 Lineární změna teploty	12
1.3.4 Modelování reakcí na zásahy termostatu	12
1.3.5 Plánování	12
1.3.6 Simulace montáže na stěně	13
2 Analýza komory	14
2.1 Akční členy komory	14
2.2 Měření teploty	16
2.3 Připojení termostatu	17
2.4 Komunikace s PC	17
2.5 Parametry soustavy	18
3 Návrh aplikace	22
3.1 Požadavky na aplikaci	22
3.2 Komunikace s komorou	22
3.3 Filtrace teploty	22
3.4 Regulátor	23
3.5 Regulace dle základních testových procedur	26
3.5.1 Držení konstantní teploty	26
3.5.2 Lineární změna teploty	27
3.6 Plánování průběhu testu	28
3.7 Operátorské ovládání	29
3.8 Přímé ovládání termostatem	29
3.9 Vykreslování grafu	29
3.10 Záznam a uložení dat	30
4 Ověření správnosti funkce	32
4.1 Konstanční teplota	32
4.2 Posun zadanou rychlostí	32
4.3 Ovládání termostatem	32

4.4	Funkčnost plánovače	33
5	Posouzení přesnosti a dynamiky komory	35
5.1	Odezva na skok žádané hodnoty	35
5.2	Odezva na lineární změnu žádané hodnoty	36
5.3	Odezva na poruchu v systému	36
5.4	Celková dynamika komory	37
6	Závěr	39
	Literatura	40
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	41
	Seznam příloh	42
A	Obsah přiloženého CD	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Komora	15
2.2	Graf vývoje teploty při vypnutých akčních členech	16
2.3	Rušení měření teploty bez kompenzace	17
2.4	Aproximace parametrů soustavy – přechodová charakteristika. Červeně obraz, modře vzor	19
2.5	Model regulované komory v Simulinku	20
2.6	Srovnání naměřených dat a modelu po započtení počátečních podmínek – odečtení 21°C, červeně data z modelu, černě původní naměřené hodnoty	21
3.1	Graf přechodového regulačního děje v závislosti na periodě zásahu regulátoru	24
3.2	Náhled na uživatelské rozhraní aplikace v režimu Cycle	28
3.3	Náhled na uživatelské rozhraní plánovače	31
4.1	Graf chování aplikace při řízení v režimu Cycle	33
4.2	Vývoj hodnot při použití plánovače	34
5.1	Srovnání měření a simulace při skoku o 5°C (modrá simulace, červená měřené hodnoty	35
5.2	Žádaná (modrá) a měřená (červená) teplota při lineárním sestupu o 5°C/hod	36
5.3	Odezva teploty v komoře na poruchu	37
5.4	Odezva modelu na poruchu	38

ÚVOD

Ve své bakalářské práci se zaměřuji na problematiku chování simulačních termálních komor pro termostaty a podobná zařízení. Zadání práce vyžaduje analýzu stávajícího laboratorního vybavení, seznámení se SW vybavením komory a ovládacím rozhraním a návrh vylepšení tohoto SW pro lepší funkčnost a naplnění účelu termálních komor. Je požadována možnost použít komoru kromě udržování statické teploty také ke skokovým dějům a lineární změny teploty k ověření řídicích algoritmů termostatů a simulaci chování reálné budovy, kam by byl termostat umístěn, podrobněji viz. 1.

Stávající SW není vhodný k dlouhodobému užívání z důvodu nestability a také svého stáří. Tento SW byl navrhován pro dnes již zastaralý operační systém, což má za následek nekompatibilitu s novějšími systémy. Dále také původní SW postrádá některé pokročilé možnosti pro testování a není ani příliš spolehlivý v udržování požadované hodnoty.

Tepelná komora má uzavřený okruh pro ovlivňování teploty vnitřního vzduchu a několik možností konfigurace proudění vzduchu uvnitř samotného testovacího prostoru. V uzavřeném okruhu se nacházejí všechny akční členy a to způsobuje nepřímou, viz. 2.1. Další úskalí spočívají v nelinearitě soustavy typu nasycení a také v rozpínání akčních členů při vysoké teplotě, což se v reálných podmínkách může stát pouze při poruše.

Laboratorní vybavení není určeno k obměně, nýbrž k modernizaci a přidání některých funkcí. Zásah do HW v laboratoři proto bude minimální. Modernizace pokrývá pouze nutně přidaná zařízení pro zpřesnění měření teploty.

Cílem práce je vytvořit nový ovládací SW, který bude stabilní, bude podporovat nové operační systémy a jeho ovládací rozhraní bude zejména v názvosloví vycházet z původního SW. Nová aplikace také musí dodržovat testové postupy a umožnit plánování průběhu testu skládáním základních procedur.

1 SEZNÁMENÍ S TESTOVÁNÍM

Testování v teplotních komorách podléhá všechny výrobky, které měří teplotu nebo může být teplotou ovlivněna jejich funkce. Testovací procedury se převážně dělí na statické a dynamické. Zařízení musí absolvovat procedury pro ověření funkčnosti v teplotní komoře simulující reálné prostředí, jestliže byly změněny HW prvky uvnitř zařízení – zejména prvky pro snímání teploty, ale také prvky s potenciálním generováním nadměrného odpadního tepla (modul bezdrátové komunikace, elektronické spínače akčních členů a podobně). Tato testování jsou prováděny také při změně teplotně kompenzačních algoritmů a jiných částí SW, které mohou zapříčinit změnu chování zařízení v závislosti na teplotě.

1.1 Testované výrobky

Výrobky, které je třeba s použitím termokomor otestovat jsou v současnosti převážně termostaty. Mezi další se řadí například doplňkové senzory, jednotky dálkového ovládání a podobná zařízení sloužící k udržování interiérového klimatu, neboli řídicí a měřicí součásti HVAC systémů.

1.2 Zdroje odpadního tepla

Drtivá většina nových zařízení obsahuje modul pro bezdrátovou komunikaci (Wi-Fi, ZigBee, proprietární rádiová řešení). Tento modul většinou generuje nezanedbatelné odpadní teplo, které se může koncentrovat uvnitř malého prostoru zařízení a způsobovat tak nežádoucí odchylku v měřené teplotě.

Výrazným zdrojem tepla se také postupně stávají spínací prvky termostatů, jelikož standardní relé jsou nahrazována elektronickými, které však trpí tepelnými ztrátami závislými na protékajícím proudu. Samozřejmě v ovládacím okruhu neprotékají závratné proudy, ale ovládání nelze provádět se zanedbatelným proudem, kvůli rušení napětím indukovaným na vedení. Na druhou stranu jsou používány také termostaty s přímým spínáním zátěže, kdy spínacím prvkem protéká až 20A.

Dalším místem, kde vzniká odpadní teplo je zobrazovací displej. Na nových zařízeních už nalezneme barevný dotykový LCD panel, který však velmi výrazně přispívá ke zvyšování teploty uvnitř přístroje.

Procesor, umožňující běh programu také vytváří odpadní teplo. U běžných procesorů používaných ve většině termostatů je vliv zanedbatelný, ale např. SW pro rozpoznávání hlasu a zpracování hlasového ovládání vyžaduje mnohem výkonnější procesor, jehož tepelný příspěvek již nelze opomenout bez dalších kompenzací.

Jak jsem naznačil v předchozích odstavcích, testování teplotních vlivů a přesnosti měření teploty je důležitou součástí vývoje nových zařízení, a proto musí všechna zařízení absolvovat testy v termokomoře.

1.3 Testovací procedury

Testovací aplikace v podstatě rozlišuje pouze 4 režimy řízení teploty, které se buď samostatně nebo kombinovaně používají k tvorbě pokročilých testovacích procedur. V následujících odstavcích popíši požadavky na chování komory a aplikace při testování. Toto chování vyplývá i z původní ovládací aplikace, kterou nový ovládací SW nahrazuje.

1.3.1 Držení konstantní teploty

Základní testovací procedura udržuje konstantní teplotu a slouží ke kalibraci statických parametrů teplotních snímačů, zejména ke zjištění konstantní odchylky hodnot a funkčnosti teplotně kompenzačních algoritmů. Testovaná zařízení zpravidla disponují více teplotními senzory rozmístěnými tak, aby byla možná co nejlepší kompenzace vlastního tepla a tím docíleno přesnější měření teploty. Kompenzační algoritmy musí s těmito odchylkami počítat. Odchylky vznikají zejména díky vyhřívání zařízení dle podkapitoly 1.2. Testování probíhá většinou při zapnutí chladného zařízení a poté při restartování zařízení. Testované zařízení v průběhu testů může absolvovat různé druhy zatížení způsobující samoohřev. Naměřené hodnoty se zaznamenávají do souboru a poté se porovnávají s daty přímo z komory, z čehož jsou vyvozeny závěry testovací procedury.

V průběhu takovýchto procedur má komora co nejrychleji dosáhnout požadované teploty a co nejpresněji ji držet. Tento mód se v aplikaci a manuálech k testování nazývá Soak.

1.3.2 Skok teploty

Tento režim je zaměřen především na rychlý přechod z jedné konstantní teploty na druhou. Spíše než reálné chování v interiérech jsou zde testovány hlavně dynamické parametry snímačů, ale třeba také reakce elektroniky na změnu okolní teploty, reakce kompenzačních algoritmů, doba změny a přesnost nové hodnoty. Kompenzační algoritmy obsahují filtry teploty, které značně zpožďují měřenou hodnotu teploty při rychlých změnách, a proto se zde také testují filtrační schopnosti a případně rychlost, za jakou zařízení zareaguje na novou teplotu.

Režim řízení teploty se jmenuje Offset a má způsobit skok o definovanou hodnotu z aktuální teploty v komoře. Po skokové změně žádané hodnoty má komora opět co nejrychleji dosáhnout nové požadované teploty a tuto držet co nejpresněji.

1.3.3 Lineární změna teploty

Teplota se v tomto režimu mění lineárně zadanou rychlostí. Lineární úseky se užívají tam, kde je třeba otestovat reakci na realistické chování. Rychlost změny zde nedosahuje takových hodnot, jako například při skokové změně, díky čemuž lze lépe optimalizovat kompenzační algoritmy a detekovat případné další chyby.

Název tohoto módu zní Drift a v komoře je požadována postupná změna teploty s co nejpresnějším sledováním hodnoty a minimálními oscilacemi. Drift má započít na aktuální teplotě komory a pokračovat s co největší přesností a zastavit se až při dosažení teplotní meze nastavené uživatelem.

1.3.4 Modelování reakcí na zásahy termostatu

K ověření ovládacích algoritmů termostatu při testování je použit právě tento režim. Ovládací aplikace nyní nerozhoduje o teplotě samostatně, nýbrž sleduje výstupy z termostatu a upravuje teplotu podle nastavených parametrů. V kombinaci s komorou tak tvoří uzavřenou smyčku a simuluje soustavu ovládaného interiéru s testovaným zařízením v roli regulátoru. Nastavené parametry reprezentují rychlosti změny teploty při různých stavech výstupů termostatu, které komora snímá. Můžou zde nastat následující stavy: vše vypnuto, topení nebo chlazení. V komoře lze vyčítat až 6 výstupů termostatu, které mohou být využity pro roli topení, chlazení nebo k řízení přepínacího ventilu tepelného čerpadla, který rozhoduje, zda jeho kompresory mají vytápět nebo chladit. Pro každý obsazený vstup uživatel zadá požadovanou rychlost změny teploty.

Aplikace má v tomto režimu udržovat teplotu v komoře v konstantním driftu, jehož směr a velikost určuje podle snímaných výstupů termostatu a nastavených parametrů. Při počátku každého driftu (změna směru nebo velikosti či při přechodu do tohoto módu) se vždy odrazí od aktuální teploty v komoře bez ohledu na předchozí požadované teploty. Režim se jmenuje Cycle a jeho možnosti využití při testování jsou velmi široké.

1.3.5 Plánování

Z těchto čtyř režimů je možno jejich řazením za sebe v čase vytvořit různé testovací procedury. Aby nemusel operátor být přítomen a měnit nastavení za běhu testu, obsahuje aplikace Scheduler, neboli Plánovač. Ve výsledku tak lze naprogramovat

průběh teploty předem a po spuštění testu již není třeba měnit režim nebo jeho parametry.

1.3.6 Simulace montáže na stěně

Speciální testovací procedura, která vyžaduje modifikaci dvířek komory pro namontování termostatu a zároveň také laboratoř temperovanou na konkrétní teplotu. Aplikace již nemá plnou kontrolu nad děním vzduchu okolo termostatu, ale řídí pouze teplotu na jeho zadní straně – simuluje tedy kupříkladu komínový efekt ve vedení kabelů nebo chladnou vnější zeď stavby. K řízení teploty uvnitř komory se při těchto procedurách obvykle používá režimů Soak a Drift, aplikace ani komora nedokážou dění okolo termostatu ovlivnit více a není tedy třeba řešit tento typ testování zvlášť.

2 ANALÝZA KOMORY

Termální komory se nacházejí v samostatné laboratoři s počítačem a chlazením. Chladicí systém laboratoře je řízen vlastním regulátorem a zajišťuje, aby v laboratoři byla udržována pokud možno konstantní teplota, jelikož termokomory ji nezanedbatelně vytápějí, což by bez kompenzace mělo vliv na jejich parametry. Systém má teplotní senzory v každém rohu místnosti, a podle nich řídí teplotu. V místnosti je ale teplota nerovnoměrná, jelikož proudění vzduchu v místnosti není homogenní díky umístění komor, pracoviště s počítačem a výdechů klimatizace. Důležité ale je, aby se teplota v okolí komor razantně neměnila, což se laboratornímu vybavení daří celkem uspokojivě.

Prostor, kde je třeba regulovat teplotu má dva vstupy vzduchu a dva výstupy vzduchu k akčním členům. Tyto čtyři průduchy jsou vybaveny klapkami, které dokážou z velké části zabránit průniku vzduchu těmito otvory. V komoře se tak dají nasimulovat různá proudění či přetlak oproti okolí. Díky vstupním průduchům na jedné straně komory je teplota v komoře nehomogenní a je ji proto třeba regulovat dle více čidel teploty, aktuálně je však používáno pouze jeden snímač. Otevření či zavření průduchů taktéž ovlivní parametry soustavy, takže je potřeba použít regulátor s různými parametry a nechat uživatele vybrat aktuální konfiguraci. V praxi se však používá jedna konfigurace pro všechny procedury.

Na Obr. 2.1 vidíme, jak teplotní komora vypadá. Za horními bočními dvířky se ukrývá řídicí systém komory, za dolními najdeme nastavitelné zátěže. Hlavní dvířka do regulovaného prostoru jsou na přední straně vedle kontrolního panelu, na kterém nalezneme měření napájecího napětí, hlavní vypínač, jističe a displeje pro zobrazení žádané (menší) a aktuální měřené (větší) hodnoty teploty.

2.1 Akční členy komory

V okruhu komory proudí jako teplotní médium vzduch. Okruh je tvořen ventilátorem k pohonu vzduchu, dvěma elektrickými topnými členy a jedním kompresorem s výměníkem určenými k chlazení.

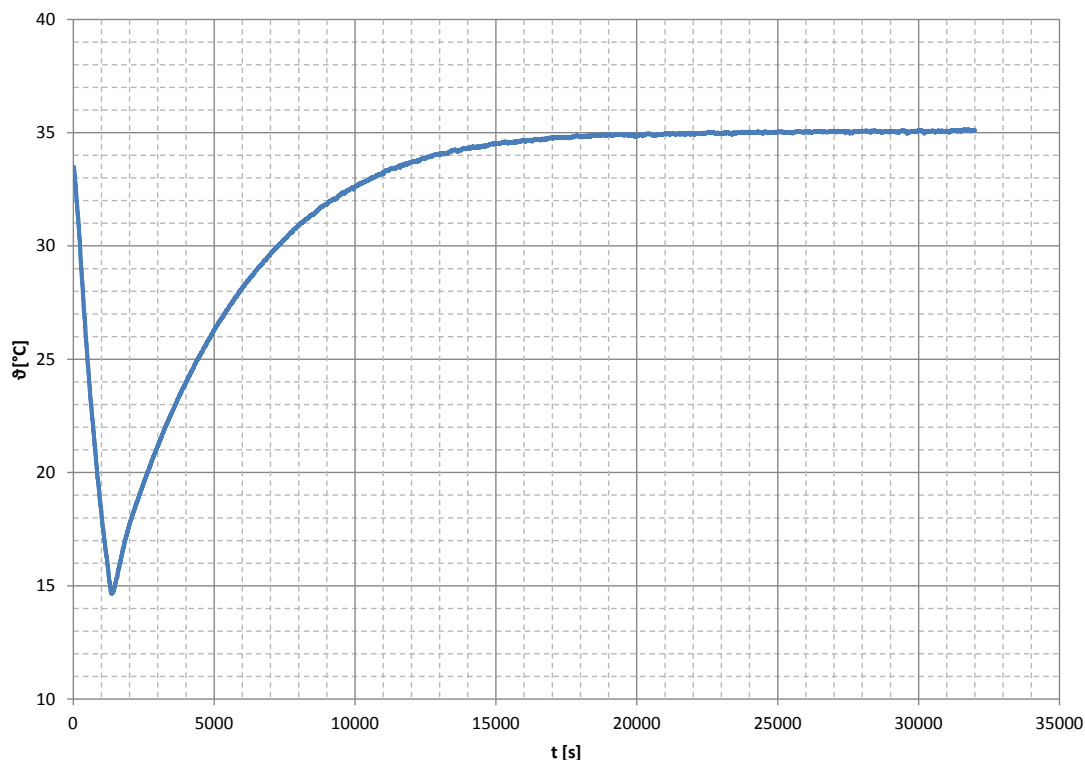
Všechny prvky jsou umístěny tak, aby docházelo k pokud možno nejmenšímu nežádoucímu ovlivnění vzduchu zvnějšku, takže se nachází v utěsněném vzduchovém potrubí, které obklopuje teplotní izolace, zabráňující změně teploty předáváním tepla mezi okolím a vzduchem uvnitř okruhu. Toto řešení je důmyslné, nicméně s sebou přináší také několik úskalí. Kromě nesnadné údržby sem patří hlavně další nežádoucí ohřevný člen - motor ventilátoru. Díky běžícímu samotnému motoru ventilátoru se vzduch v komoře ohřívá a pomalu se tak dostane na hodnotu přibližně 35°C. Toto



Obr. 2.1: Komora

chování je znázorněno grafem na obrázku 2.2, kde byla komora na počátku měření ochlazena na 15°C a poté byly všechny akční členy vypnuty.

Topné členy jsou realizovány jako dva páry Nikl-Chromového drátu namotaného na keramické tyči. Výkon těchto členů je 500W , dohromady tedy celkový topný výkon činí 1kW . Odpor Nikl-Chromové slitiny v používaném rozsahu vzroste o 1.5% , takže nelinearita, která tím vznikne je zanedbatelná. Každý pár může mít vlastní řízení, nicméně chvíli trvá, než se těleso nahřeje, proto je lepší je používat současně. Řízení je zde realizováno pulsně šířkovou modulací s periodou 2s , takže střída odpovídá dodávanému výkonu. Každý pár topných těles je sériově spojen s tepelným limitním spínačem na 55°C , který zajistí, že se okruh výkonem topných těles neroztaví. Toto omezení teploty může narušit regulační děj, ale praktické testy ukázaly, že při běžném používání k rozepínání topného okruhu nedochází, jelikož chlazení v okruhu je dostatečné k zamezení tohoto jevu. V případě limitního odpojení topných těles tedy dochází k poruše kompresoru a celá testovací procedura je narušena

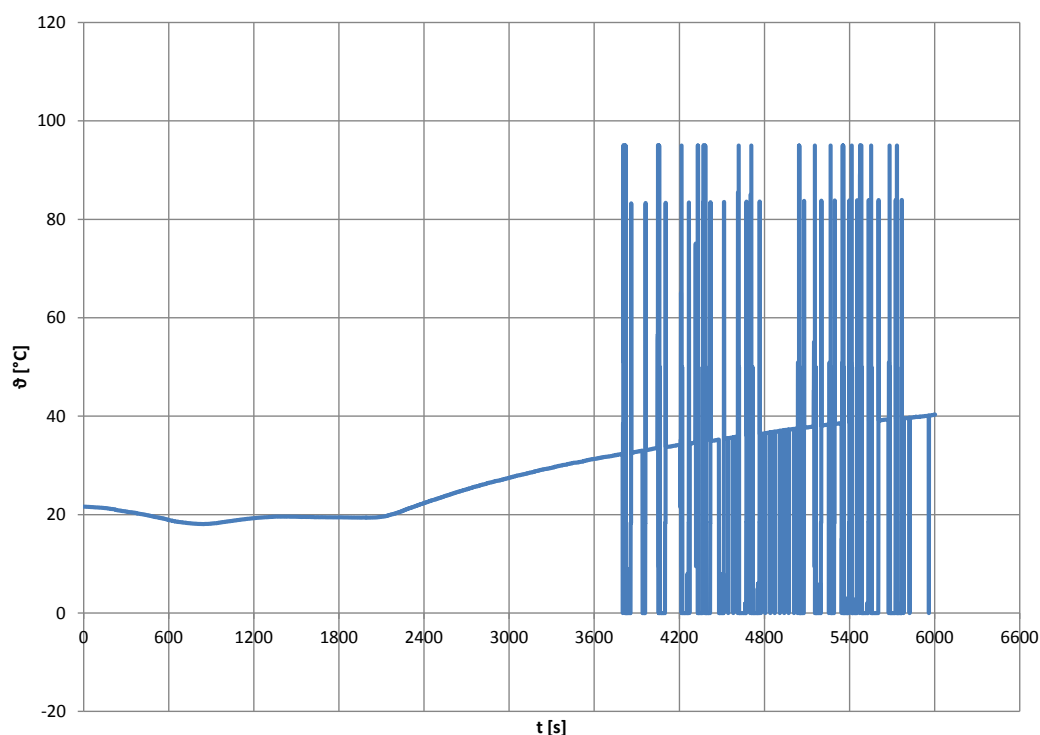


Obr. 2.2: Graf vývoje teploty při vypnutých akčních členech

a nelze v ní již pokračovat.

2.2 Měření teploty

Teplota v termokomoře je měřena snímačem PT1000, jehož odpor se v A/D převodníku převádí na teplotu, kterou reprezentuje. Závislost odporu na teplotě je lineární a její směrnice a posunutí se dá dodatečně upravit trimry v převodním modulu. Na vstup A/D převodníku se běžně dostává rušení - viz 2.4. Elektronika komory je připravena pro připojení až 4 analogových vstupů, z čehož 2 mají připojen snímač teploty PT1000. Druhý snímač však není zkalibrován, ani vyveden dovnitř komory, což je nutno provést pro zpřesnění měření teploty a potlačení rušení. Zbylé dva kanály nejsou momentálně využity. Rušení bez kompenzace je zobrazeno v grafu 2.3. Výsledná citlivost snímače je $10^{\circ}\text{C}/\text{V}$ a všechny převodníky tuto hodnotu převádějí přímo na teplotu s přesností na 2 desetinná místa.



Obr. 2.3: Rušení měření teploty bez kompenzace

2.3 Připojení termostatu

Termostat je v komoře připojen k patřičnému napájecímu napětí dle typu termostatu: 220V nebo 24V střídavého napětí. V případě jiného napájení se postupuje bez připojení termostatu k pracovnímu nulovému vodiči. Dále jsou v komoře vstupy k jednotlivým spínaným zátěžím, které slouží k připojení výstupů termostatu. Spínané zátěže jsou uživatelsky nastavitelné a jejich účel tkví v simulaci ohřevu proudem, který protéká výstupní svorkou termostatu. Další možností využití je informace pro připojený počítač, kdy je teplota v komoře upravována dle aktuálního výstupu termostatu - viz. 1.3.4.

2.4 Komunikace s PC

Komunikace s počítačem je realizována RS-232 rozhraním. Díky tomu, že se využívá přenos informace napětovou úrovní, vzniká na lince mezi počítačem a komorou rušení. Měřicí A/D převodníky jsou také zatíženy rušením, které je nutno filtrovat. Mezi nejčastější zdroje rušení zde patří:

- spínání chladících ventilátorů – generuje výrazné rušení, které zkresluje měřenou teplotu a navíc je schopno znehodnotit kompletní posílanou zprávu - vygeneruje náhodou zprávu. Proto se ventilátory zapínají společně s komorou a po spuštění testu se již nezasahuje do jejich chodu, takže toto rušení během testu nevzniká, a proto není nebezpečné.
- sepnutí/rozepnutí kompresoru – podobně jako chladící ventilátory, tak kompresor chlazení se ponechává zapnutý z důvodu rušení při jeho sepnutí či rozepnutí, ale také kvůli klidovému ohřevu komory (viz. 2.1). Rušení díky tomu během testu obvykle nevzniká, avšak může vzniknout, pokud je test spuštěn krátce po dokončení předešlého testu - musí se zde uplatnit minimální doba pro vyrovnání tlaků v kompresoru.
- sepnutí/rozepnutí topných členů – vznikají zde proudové výrazné změny elektromagnetického pole v okolí topných těles a jejich přívodů energie. Tyto změny jsou periodické a nastávají takřka neustále, nicméně netrvají dlouho a vzniklé rušení příliš neovlivňuje měřenou hodnotu teploty, tudíž se dá filtrovat použitím průměrování historie naměřených hodnot.
- ostatní komory – v laboratoři jsou umístěny celkem 3 komory a vzájemně se proto mohou rušit. Naštěstí má toto rušení větší útlum, než vlastní rušení komory a díky tomu se vyskytuje pouze ojediněle.
- další vybavení laboratoře – počítač, klimatizace.

Rušení dat by bylo lépe potlačeno přenosem informací po proudové lince RS485, která je v komoře instalována, avšak je okamžitě převáděna na napětovou, protože výrobce nechtěl používat převodník RS485/RS232 na straně PC a tedy vně komory samotné.

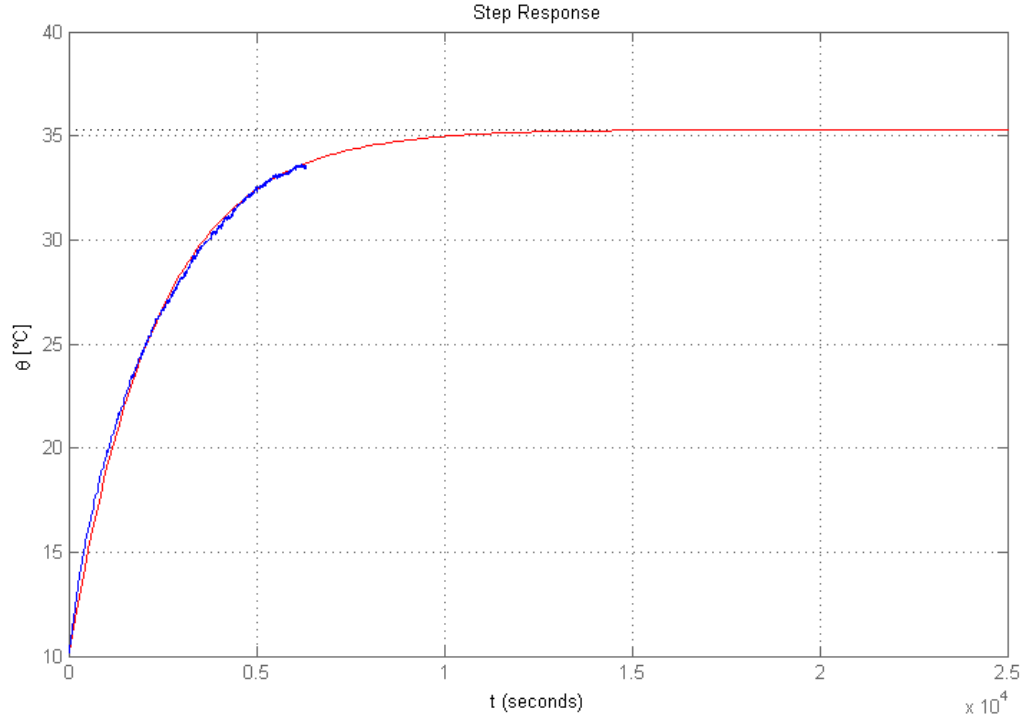
Komunikaci vždy zahajuje počítač, který každou sekundu pošle příkaz, který obsahuje počáteční znak, ID komory, nastavení topných členů a chlazení a žádanou hodnotu – ta zde slouží pouze k zobrazení na displeji komory, uvnitř procesoru komory neprobíhá žádná regulace. Na konci zprávy se nachází kontrolní součet a ukončovací znak. Na tento příkaz komora odpoví hlášením o stavu, opět vyšle počáteční znak, ID komory, stav jednotlivých analogových kanálů – měřené hodnoty, stav výstupních svorek termostatu, kontrolní součet a ukončovací znak.

2.5 Parametry soustavy

Pro základní parametrizaci soustavy jsem zvolil metodu odečtení časových parametrů z přechodové charakteristiky soustavy. K tomuto účelu byla soustava vychlazena na 10°C a následně byly přepnuty topné členy z 50% na 60% výkonu. Změřená přechodová charakteristika má tvar odezvy soustavy prvního řádu se zesílením 2,53 a

časovou konstantou 2300 s a ještě s dopravním zpožděním 6 s. Toto dopravní zpoždění je však vzhledem k dynamice systému zanedbatelné. Porovnání přechodových charakteristik naleznete v grafu 2.4. První pokus o identifikaci má tedy tvar:

$$F_{s1} = e^{-6p} \cdot \frac{0.0011}{p + 4.35 \cdot 10^{-4}} \quad (2.1)$$

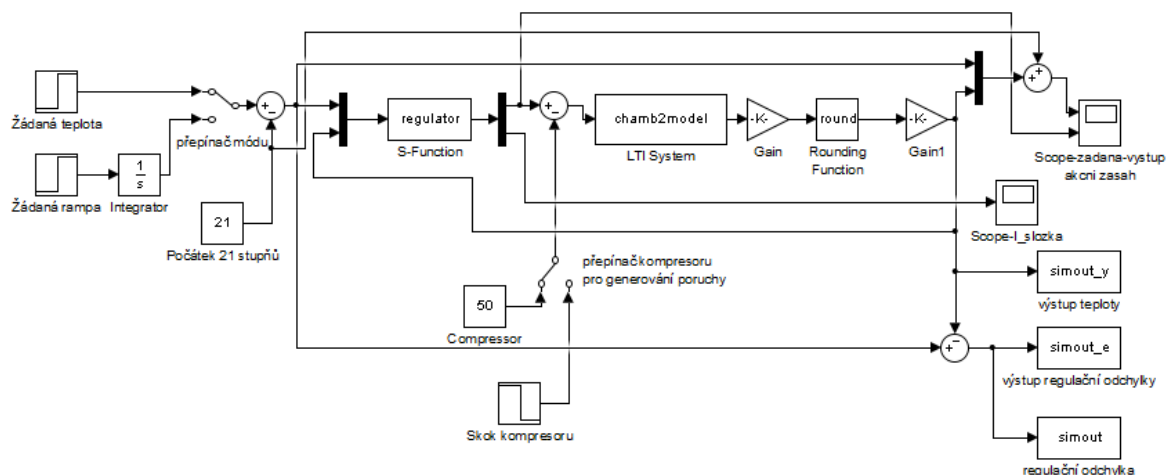


Obr. 2.4: Aproximace parametrů soustavy – přechodová charakteristika. Červeně obraz, modře vzor

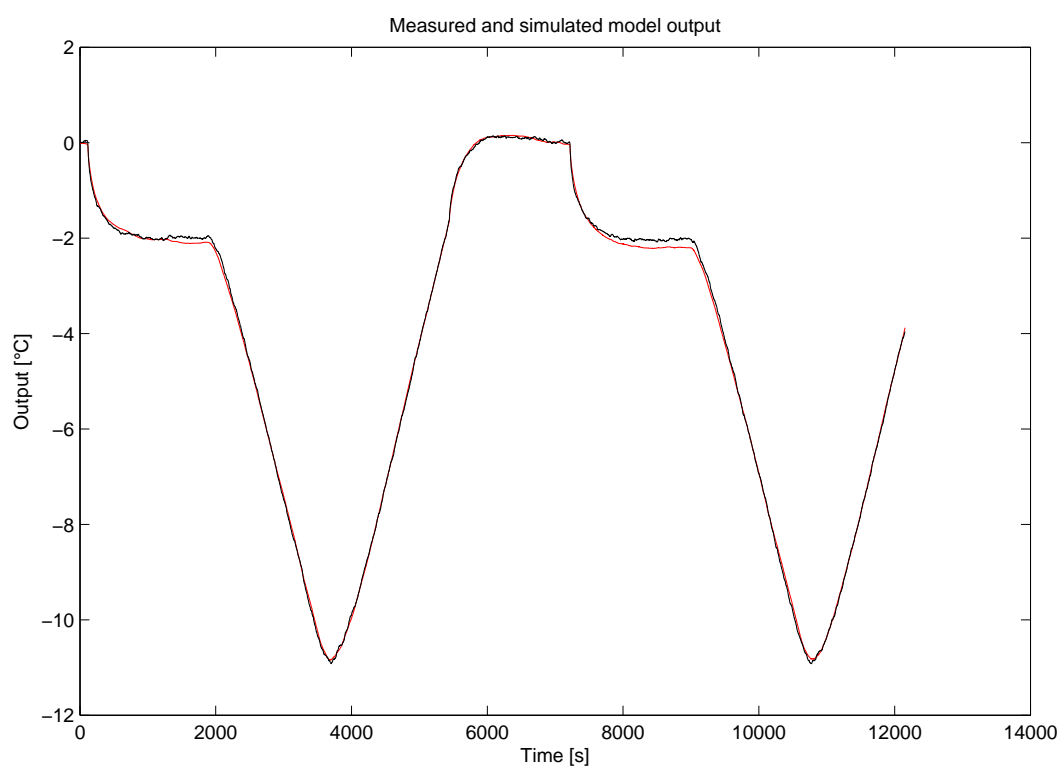
Při zpřesnění modelu jsem již k identifikaci použil System Identification toolbox v Matlabu. Jako vstupní data posloužily naměřené průběhy při skokových změnách žádané teploty za použití PI regulátoru s parametry navrženými podle základního identifikované soustavy komory. Systém byl poté odhadnut na 2 póly a 1 nulu s dopravním zpožděním 10s. S touto soustavou poté pracuje model v Simulinku (Obr. 2.5), kde je modelování včetně výstupního rozlišení a nasycení regulátoru. Soustava se v požadovaném rozsahu chová lineárně, nelinearity jsou způsobeny pouze kvantováním výstupní hodnoty a saturací akčních členů. Shoda s původními naměřenými daty je 97%. Data naměřených dat a odezvy modelu na shodný vstup lze pozorovat v grafu na Obr. 2.6. Model samotné soustavy tedy vypadá takto:

$$F_s = e^{-10p} \cdot \frac{0.001096p + 3.004 \cdot 10^{-6}}{p^2 + 0.009689p + 9.244 \cdot 10^{-6}} \quad (2.2)$$

Při tvorbě přenosové funkce bylo nutné počítat s počátečními parametry v měřených datech, jako pracovní bod jsem tedy zvolil 21°C, což je reálně udržitelná teplota v laboratoři. Chlazení v okruhu se chová jako trvalá porucha na vstupu soustavy, která se odečítá od vstupního výkonu. Vyrovnání působení kompresoru po jeho spuštění chvíli trvá, jelikož je třeba vyčkat ustálení této poruchy, takže testování je možno započít až přibližně po 20 minutách.



Obr. 2.5: Model regulované komory v Simulinku



Obr. 2.6: Srovnání naměřených dat a modelu po započtení počátečních podmínek—odečtení 21°C, červeně data z modelu, černě původní naměřené hodnoty

3 NÁVRH APLIKACE

V této kapitole se budu věnovat vlastnímu návrhu aplikace dle kritérií v části 1.3. Kromě reakcí na povely uživatele má mít nový SW také srozumitelné uživatelské rozhraní, díky kterému bude snadno pochopitelné dění v komoře a také nastavení požadovaných hodnot. Náhled uživatelského rozhraní je vidět na Obr. 3.2.

Aplikace je psána v jazyce C# s použitím prostředí Microsoft Visual Studio Express 2012 a balíčku .NET Framework 4.

Při spuštění programu probíhá inicializace, která zahrnuje konfiguraci výchozích parametrů regulátoru a testovacích procedur, načtení parametrů regulátoru ze souboru a ověření, zda byla dodržena minimální doba vypnutí kompresoru v komoře kvůli jeho ochraně před zničením. Pokud bylo poslední vypnutí méně než před 3 minutami, aplikace znemožní opětovné zapnutí kompresoru před uplynutím této doby.

3.1 Požadavky na aplikaci

Aplikace musí stabilně pracovat v dlouhodobých intervalech (dny až týdny) a musí co nejpřesněji udržovat žádanou hodnotu. Povolená odchylka je maximálně $0,15^{\circ}\text{C}$ při konstantním řízení a $0,5^{\circ}\text{C}$ při lineární změně teploty. Překmit při skoku žádané veličiny má být co nejmenší. Uvažovaný rozsah teplot v komoře je $0-40^{\circ}\text{C}$, avšak prakticky se používá $15-28^{\circ}\text{C}$.

3.2 Komunikace s komorou

Komunikaci obstarává komponenta SerialPort, které uživatel před spojením s komorou nastaví pouze port, ke kterému je komora připojena. Komunikační rychlost je 9600 baud. Přenos dat lze z důvodu rušení uskutečnit maximálně jednou za sekundu. Kvůli periodě regulátoru a PWM uvnitř komory se tato frekvence komunikace osvědčila jako nejlepší.

3.3 Filtrace teploty

Jak jsem již popsal v kapitole o komunikaci (2.4), obsahují výstupní měřené hodnoty náhodné rušení, které musí program filtrovat. Pro filtraci jsem použil vážené průměrování posledních 3 naměřených hodnot s vahami 50, 33 a 17%, přičemž nejvyšší váhu má nejnovější hodnota a zbytek již slouží pouze pro korekci. Počet hodnot jsem zvolil s přihlédnutím k rychlosti změn výstupu a hlavně k periodě regulátoru.

Filtrace z většího množství hodnot by již způsobovala další zpomalení a zkreslila by tak proces regulace.

SW jsem připravil k použití druhého osazeného teplotního senzoru, nicméně dokáže fungovat i bez něj. Aplikace při měření ze dvou senzorů tyto dva průměruje a výsledek filtruje.

3.4 Regulátor

Regulátor běží v aplikaci ve vlastním vlákně a přebírá žádanou a měřenou hodnotu z vlákna uživatelského rozhraní. Výpočet výstupu regulátoru probíhá každé 2 sekundy, ale lze nastavit i delší perioda. Z důvodu délky periody PWM pro topná tělesa 2s nemá smysl počítat akční zásah častěji a kvůli regulaci v driftových módech, kdy nejrychlejší změny trvají 1,8s zase smysl postrádají delší periody vzorkování. Navíc se regulační děj při větších periodách regulátoru chová nekorektně, viz graf na Obr. 3.1, kde můžeme pozorovat postupné zpomalování, následně zvyšování překmitu a značné oscilace výstupu s rostoucí periodou regulátoru. Při tvorbě tohoto grafu byl vždy zvolen nejvhodnější regulátor dle kvadratického kritéria, data pocházejí ze simulace s použitím modelu v Simulinku (kapitola 2.5).

Akční zásah regulátoru se pohybuje v rozsahu 0-99,9% výkonu a počítá se z žádané hodnoty dle aktuálního módu řízení a filtrované měřené hodnoty teploty. Kvůli omezení překmitu při skoku žádané veličiny jsem použil diskretní variantu β PID regulátoru s následujícím algoritmem pro výpočet výstupní hodnoty:

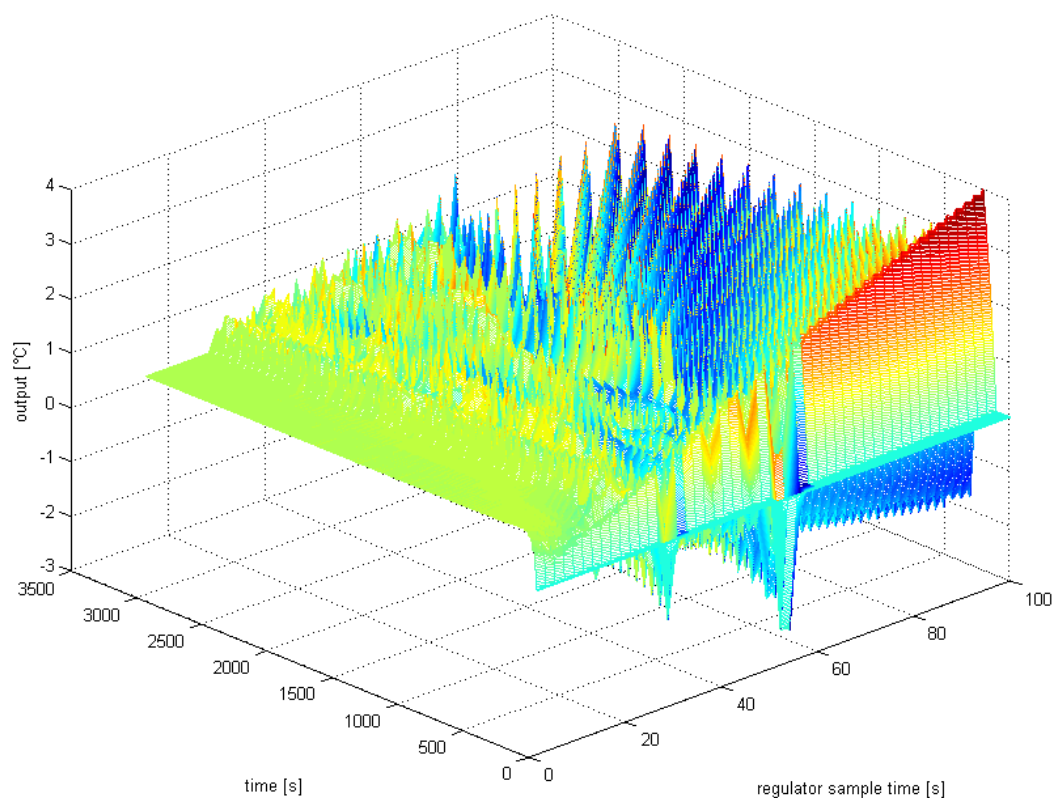
$$U(z) = K_P \cdot \left(\beta \cdot W(z) - Y(z) + \left(\frac{T_s \cdot z^{-1}}{T_I \cdot (1 - z^{-1})} + 4 \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{4T_s}{T_D}} \cdot z^{-1}} \right) \cdot (W(z) - Y(z)) \right) \quad (3.1)$$

Po výpočtu výstupní hodnoty regulátoru přichází ověření, zda nebyly přesaženy mezní hodnoty akčního zásahu, v tom případě zasáhne anti wind-up rutina, která sníží hodnotu integrační složky pro příští výpočet a zároveň omezí aktuální hodnotu výstupu regulátoru.

Pro rychlejší kompenzaci zapnutého kompresoru je počáteční hodnota integrační složky nastavitelná, což má při správné volbě hodnoty za následek rychlejší počáteční ustálení teploty v komoře.

Nastavení parametrů regulátoru a žádané hodnoty probíhá na kartě Auto. Parametry jsou uloženy v konfiguračním XML souboru pro každou komoru zvlášť, aby je nemusel obsluhující personál pokaždé nastavovat.

Parametry regulátoru byly ve finále vypočteny rovněž dle kvadratického integračního kritéria váženého časem s použitím modelu soustavy v Simulinku. Výsledné



Obr. 3.1: Graf přechodového regulačního děje v závislosti na periodě zásahu regulátoru

parametry regulátoru:

$$K_P = 53,5$$

$$T_I = 95,8$$

$$T_D = 4,6$$

$$\beta = 0,9$$

Zdrojový kód funkce pro výpočet akčního zásahu naleznete níže. Tento kód je spouštěn v nastaveném intervalu (obvykle 2s) z vlastního vlákna aplikace, které slouží pouze k regulaci.


```

    if (readPV == null || readSP == null || writeOV == null)
        return;
double pv = readPV(); //merena vystupni hodnota
double sp = readSP(); //zadana hodnota
    origPV = pv; //zachovani pro dalsi vypocty
double err = sp - pv; //regulacni odchylka
DateTime nowTime = DateTime.Now;
double Ts = ((nowTime - lastUpdate).TotalSeconds);
//cas od posledniho vypoctu
double pTerm;
double iTerm = 0.0f;
double dTerm = 0.0f;
double igain_coef = 0;
double Tt = 1;
//kp, ki, kd - parametry regulatoru
if (ki > 0)
{
    igain_coef = Ts * kp / ki;
}
else
{
    igain_coef = 0;
}
pTerm = kp * (beta*sp - pv);
iTerm = igain_coef * (ek1) + xik1;
//xik1 ek1 - ulozone hodnoty z predchoziho vypoctu
if(Ts>0)
{
    dTerm = kp * N * (err - ek1) + Math.Exp(-Ts*N/kd)*xdk1;
}
else
{
    dTerm = 0;
}
xik1=iTerm;
double xout=pTerm+iTerm+dTerm;
if(xout>outMax)
{
    if (Math.Abs(dTerm) < 20)

```

```

    {
        xik1 = iTerm + (outMax - xout) / antiWU;
    }
    else if (pTerm + iTerm > outMax)
    {
        xik1 = iTerm + (outMax - pTerm - iTerm) / antiWU;
    }
    xout=outMax;
}
else if (xout<outMin)
{
    if (Math.Abs(dTerm) < 20)
    {
        xik1 = iTerm + (outMin - xout) / antiWU;
    }
    else if (pTerm + iTerm < outMin)
    {
        xik1 = iTerm + (outMin - pTerm - iTerm) / antiWU;
    }
    xout=outMin;
}
ek1 = err;

lastUpdate = nowTime;
lastPV = pv;
writeOV(xout);

```

3.5 Regulace dle základních testových procedur

Nastavení průběhu teploty jsem v podstatě vyřešil dvěma způsoby:

- konstantní teplota - Soak a Offset
- postupná lineární změna - Drift a Cycle

Základní nastavení aplikace omezuje žádanou hodnotu na interval 10-35°C, což postačí pro většinu testů, limity lze však uživatelsky rozšířit na 0-45°C.

3.5.1 Držení konstantní teploty

Procedury Soak a Offset vždy reagují jako na skok žádané hodnoty, jejich rozdíl tkví v tom, že Soak má žádanou hodnotu nastavenou absolutně, takže pokud chci

v komoře udržovat 25°C, bude tam 25°C, zatímco Offset nastaví novou žádanou hodnotu relativně vůči aktuální měřené teplotě. Nastavím-li tedy v tomto režimu skok o +2°C, teplota v komoře se co nejrychleji zvýší o tuto hodnotu. Žádaná hodnota vstupující do regulátoru se změní pouze v momentě uživatelského požadavku. V případě překročení rozsahu daného nastavenými limity je nastavena příslušná limitní hodnota.

V uživatelském prostředí je pro tyto procedury na kartě Manual vyhrazeno místo, kam se zapisuje požadovaný parametr. Režim Soak přímo předává nastavenou hodnotu regulátoru, zatímco mód Offset provede skok po stisku tlačítka Make jako zápis nové žádané hodnoty do regulátoru.

3.5.2 Lineární změna teploty

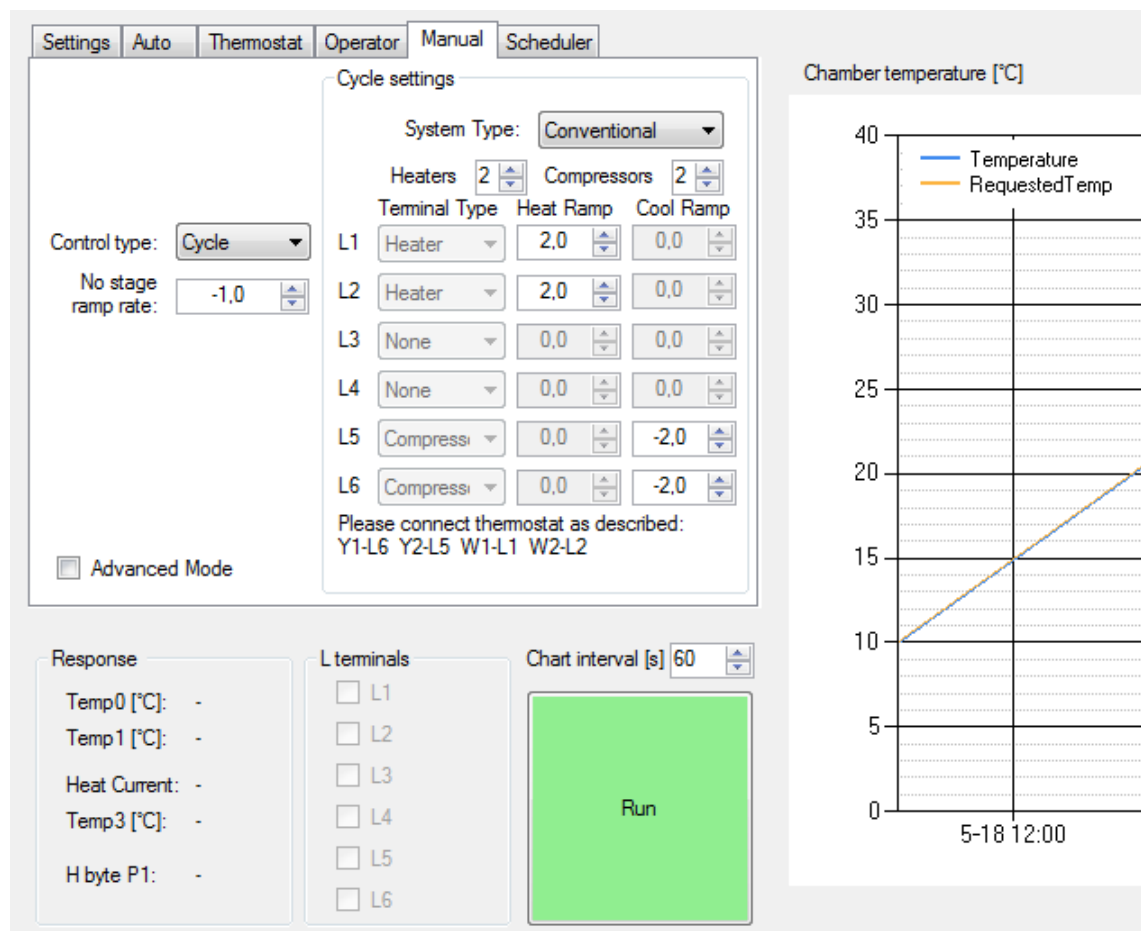
Režimy Drift a Cycle vyžadují změny teploty dle zadané rychlosti. Řízení je možno řešit buď časovou integrací požadované změny do žádané hodnoty nebo derivací teplotního výstupu soustavy. Při regulaci derivovaného výstupu by bylo třeba použít regulátor s jinými parametry a navíc by soustava mohla časem dosáhnout odchylek od lineárního průběhu. Výstup soustavy má příliš malou citlivost k realizaci řízení derivační funkcí (největší změny trvají 1,8s).

V aplikaci jsem tuto změnu vyřešil jako časovou integraci nastavené hodnoty rychlosti do žádané hodnoty, která vstupuje do regulátoru. Regulátor tedy zůstává stejný, ale jeho vstup se mění. Změna je prováděna, když uplyne čas, za který se žádaná hodnota má změnit o 0,01°C, pro nejvyšší uvažovanou rychlost (20°C/hod) je to 1,8s. Po dosažení nastavené limitní hodnoty se postup žádané hodnoty zastaví na tomto limitu a dále nepokračuje. Tyto režimy rovněž nalezneme na kartě Manual.

Drift uvažuje pouze 1 hodnotu rychlosti, kterou uživatel nastaví, postupuje tedy konstantně až do uživatelského zásahu nebo dokud nenarazí na limit.

Cycle uvažuje několik nastavených hodnot, které použije dle snímaných výstupů termostatu. Aplikace k tomu využívá vlastní třídu, která definuje jednotlivé hodnoty pro různé kombinace sepnutých výstupů, včetně případu, kde není sepnut žádný výstup. Hodnoty přiřazené k sepnutým výstupům se přičítají k základní hodnotě, která simuluje přirozené ohřívání či ochlazování interiéru. Uživatelské rozhraní umožňuje nastavení všech těchto parametrů dvěma způsoby: buď se zadávají přímo jako parametry vkládané do této třídy nebo se před uložením přepočítají tak, aby při sepnutém topení hodnota rychlosti dosahovala uživatelem nastavené hodnoty, což je základní nastavení. Tento režim podporuje až 6 vstupů z termostatu a 2 režimy připojení, které postačují k realizaci běžných typů HVAC systémů. V základním nastavení není možné přiřadit terminálům význam dle uživatelských preferencí, nicméně

v pokročilých možnostech již může uživatel nastavit vše potřebné podle svých požadavků.



Obr. 3.2: Náhled na uživatelské rozhraní aplikace v režimu Cycle

3.6 Plánování průběhu testu

Velmi často využívaný způsob řízení komory je plánování, které je v aplikaci umístěno na kartě Scheduler. Plán je tvořen ze základních procedur, kdy každé položce lze přiřadit vlastní nastavení. Odpadá zde tedy riziko uživatelské chyby při obsluze programu po dlouhou dobu s nutností dodržovat časové intervaly změn nastavení, prostě si uživatel nastaví celý postup předem. Doba trvání jednotlivých částí je zadána v minutách. Po uplynutí doby trvání aktuální položky program přejde k následující položce a změní své chování podle nového nastavení. Každou položku reprezentuje instance vlastní třídy, která obsahuje veškerá nastavení potřebná k chodu aplikace dle uživatelských požadavků.

Jednotlivé instance jsou řazeny v řetězeném seznamu a v uživatelském rozhraní je reprezentuje komponenta ListBox, kde se zobrazuje název spolu s důležitými parametry plánovaných částí testu. Po skončení plánu zůstane teplota komory nastavena dle poslední žádané hodnoty, plán však může uživatel nechat v nekonečné smyčce opakovat zatržením políčka Repeat.

Uživatel může položky přidávat tlačítkem Add, zkontrolovat nastavení nebo upravit zvolenou část tlačítkem View/Edit, smazat tlačítkem Remove a měnit pořadí tlačítka s šipkami. Pokud je ovládání právě soustředěno na seznam položek, může uživatel použít kláves Insert, Enter, Delete a kombinací Shift+Nahoru a Shift+Dolů k provedení shodných operací. Přidávání, náhled a úpravy jsou realizovány v samostatném dialogovém okně pro lepší přehlednost aplikace. Uživatelské prostředí pro přidávání položek do plánu vidíme na Obr. 3.3.

Aktuální plán lze uložit tlačítkem Save. Uložené plány se dají načíst tlačítkem Load. Toto řešení je obzvláště výhodné při opakovaných procedurách, kdy stačí pouze otevřít soubor s uloženou procedurou a pak již jen spustit testování. Soubory s plány se ukládají ve formátu XML.

3.7 Operátorské ovládání

Tento mód aplikace reprezentuje manuální řízení soustavy. Regulátor je zde zastaven a neprovádí žádné výpočty. Akční zásah přímo určuje operátor pro každé topné těleso zvlášť, může případně vypnout chlazení a dosáhnout tak vyšších teplot. Plně manuální režim většinou není používán, slouží obvykle pouze k aproximaci parametrů komory nebo k diagnostice.

3.8 Přímé ovládání termostatem

Z historických důvodů bylo nutné zachovat v aplikaci i možnost přímého ovládání komory termostatem. Termostat v tomto režimu přebírá plně roli regulátoru a udává jednotlivým topným členům výkon dle počtu sepnutých výstupů a nastavení aplikace. Tento režim je však značně nepřesný a prakticky se nevyužívá.

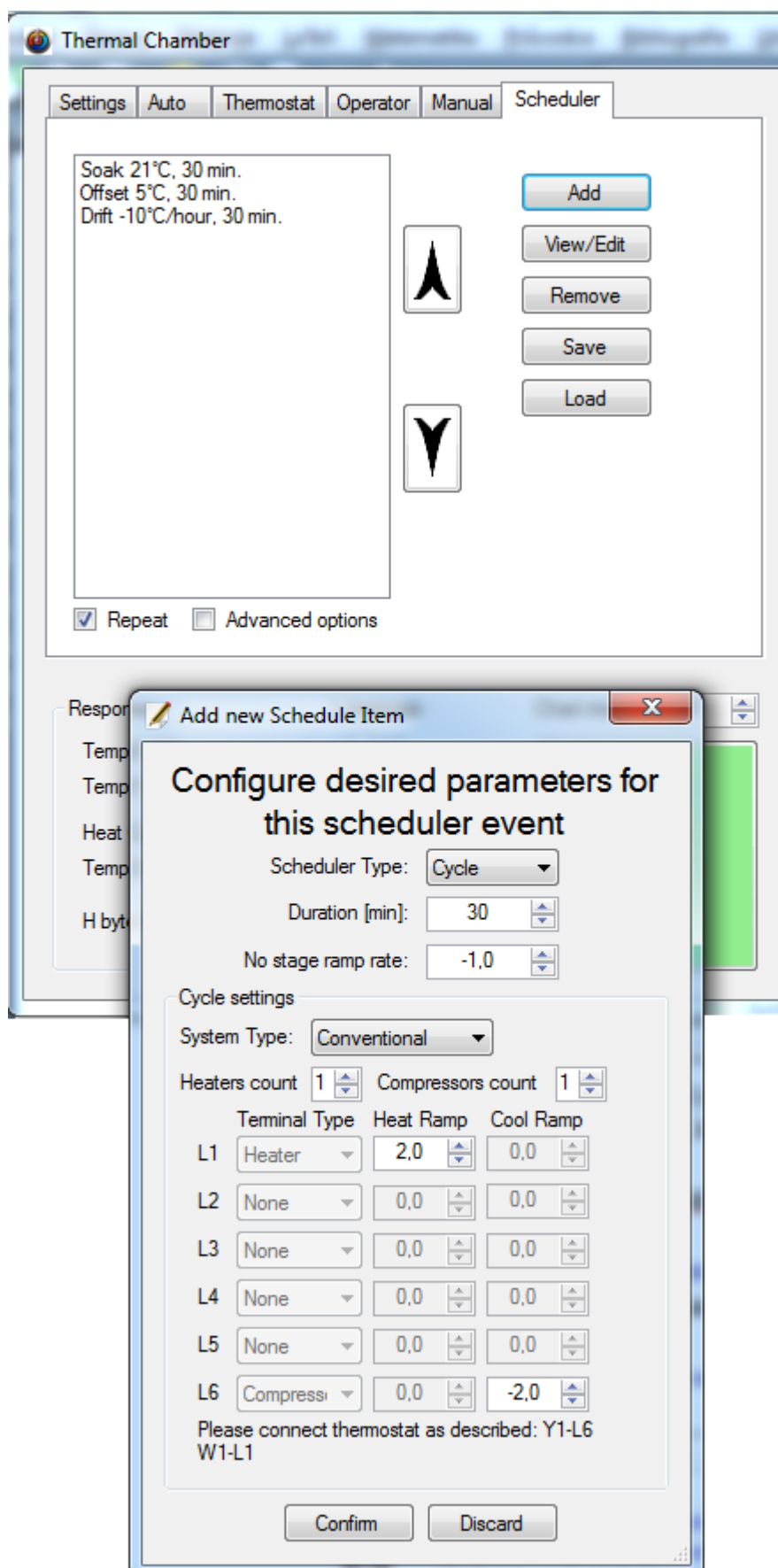
3.9 Vykreslování grafu

Aktuální žádaná hodnota a filtrovaná měřená hodnota vizualizuje aplikace v časovém grafu. Počet hodnot zobrazených v tomto grafu je limitován na posledních 1000,

interval vykreslování (ukládání hodnot) si uživatel může kdykoliv nastavit na 2-3600 sekund. Na svislé ose grafu se nachází teplota a na vodorovné datum a čas dle UTC.

3.10 Záznam a uložení dat

Do souboru se záznamem aplikace ukládá automaticky měřené hodnoty, filtrovanou hodnotu teploty, akční zásah a časové značky. Záznam je proveden s každou přijatou zprávou, v ideálním případě tedy každou sekundu. Data se ukládají do souboru CSV ve složce definované uživatelem. Záznam lze deaktivovat, při běžném použití však není deaktivace žádoucí. Po spuštění testu již není možno do možností záznamu zasahovat.



Obr. 3.3: Náhled na uživatelské rozhraní plánovače

4 OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI FUNKCE

Funkčnost aplikace jsem mnohokrát podrobil testu stability jak v rámci simulace na počítači, tak při nasazení v laboratoři, kdy se mi podařilo odchytit většinu situací, při kterých by mohlo dojít k chybě. Program tedy pracuje spolehlivě, stabilně a dlouhodobě. Dále jsem také testoval regulační schopnosti, přesnost nastavení plánovače a dodržování testovacích procedur.

4.1 Konstanční teplota

Při regulaci na konstantní teplotu v aplikaci může dojít jedině k překročení nastavených limitů. V případě zadání hodnot mimo vymezený interval aplikace automaticky žádanou hodnotu upraví k bližší hranici intervalu. Procedury Soak a Offset, které tento druh řízení užívají jsem důkladně otestoval pro přesahy limitů žádané hodnoty. U Offsetu si musíme uvědomit, že zadávaná hodnota neodpovídá žádané hodnotě teploty v komoře, a proto je nutné podívat se na kartu Auto na aktuální žádanou hodnotu, případně ji odečíst z grafu. Při postupu testu podle plánovače program provádí Soak a Offset změnou žádané hodnoty v momentě počátku trvání těchto položek. Program udržuje konstantní žádanou hodnotu bez problémů a akčními zásahy dokáže teplotu v komoře udržet v rozmezí do $0,1^{\circ}\text{C}$ od žádané hodnoty, tedy $0,25\%$ z rozsahu, kde se již pohybuje na hranici šumu a chyb snímačů a převodníků.

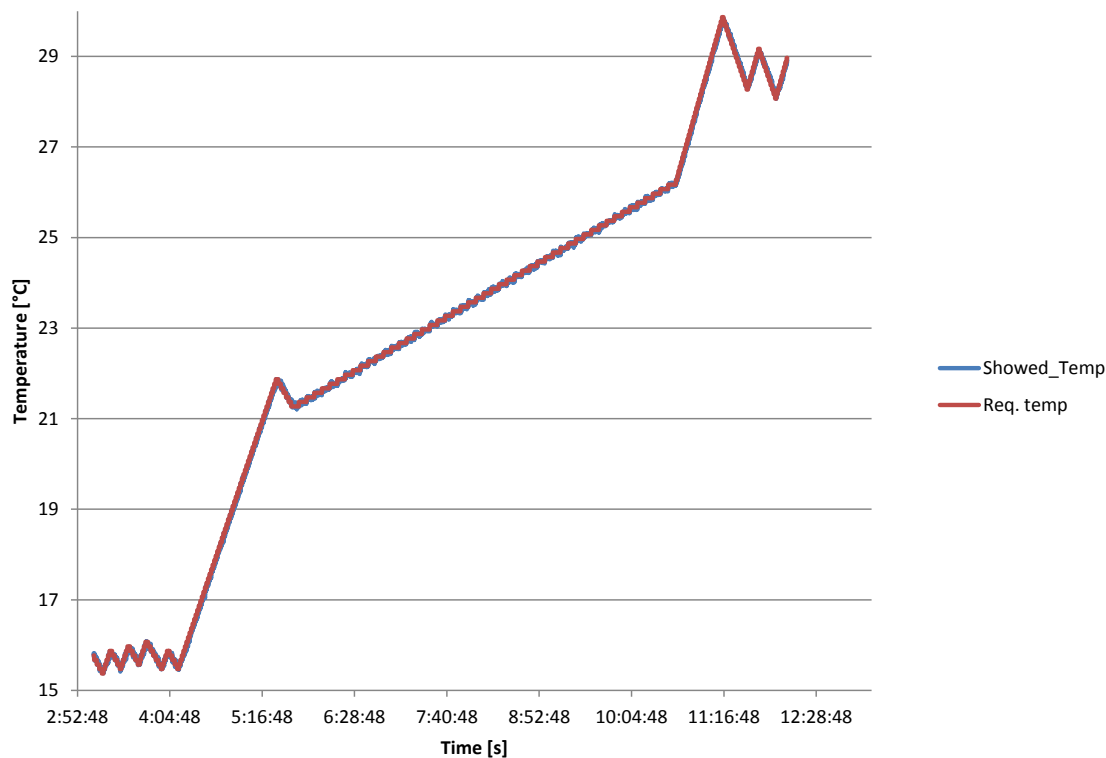
4.2 Posun zadanou rychlostí

K žádané hodnotě vstupující do regulátoru se správně přičítá při dosažení času potřebného pro minimální změnu teploty o $0,01^{\circ}\text{C}$ v patřičném směru. Program periodu vyhodnocuje z rozdílu času hodin počítače a času poslední změny. Při nejvyšší rychlosti změny ($20^{\circ}\text{C}/\text{hod}$) zaostává komora maximálně o $0,4^{\circ}\text{C}$ za žádanou hodnotou, tedy 1% z uvažovaného rozsahu. Po dosažení limitu zůstane žádaná hodnota konstantní.

4.3 Ovládání termostatem

V tomto režimu aplikace udržuje teplotu v neustálém pohybu podle nastavených parametrů a vyčítaných výstupů termostatu. Výsledná teplota tedy není dána přímo aplikací, ale režimem a žádanou hodnotou termostatu. Správnost tohoto režimu jsem ověřil víkendovým testem, kdy byl termostat nastaven na udržování teploty mezi 16 a 29°C . Chování můžeme pozorovat v grafu na Obr. 4.1, kde na začátku

byla základní rychlost $-5^{\circ}\text{C}/\text{hod}$, před 6:00 termostat vytopil prostor na 21°C rychlostí $+5^{\circ}\text{C}/\text{hod}$, v 5:40 aplikace postoupila do další fáze, kdy základní rychlost byla $+1^{\circ}\text{C}/\text{hod}$, v 10:40 byla základní rychlost změněna na $+5^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ a chladicí rychlost byla $-5^{\circ}\text{C}/\text{hod}$.



Obr. 4.1: Graf chování aplikace při řízení v režimu Cycle

4.4 Funkčnost plánovače

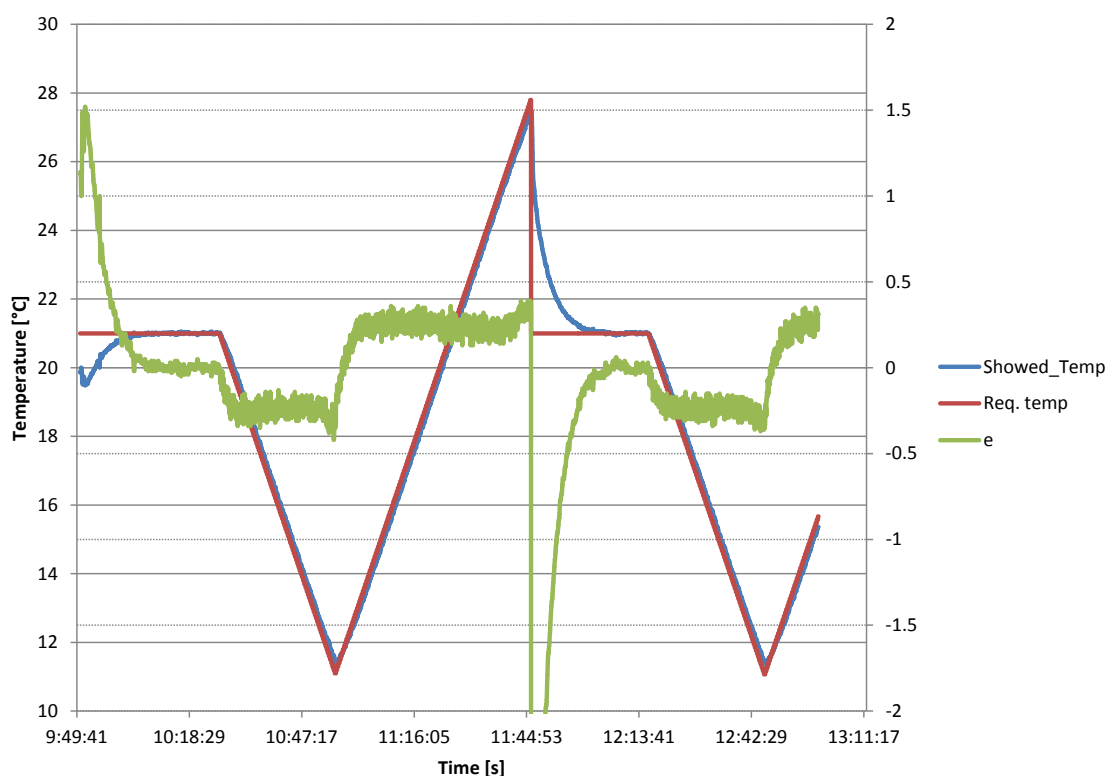
Aplikace dodržuje délky jednotlivých částí plánu s přesností 1s, což je dáno časovačem, který spouští generování a posílání příkazů komoře. Vzhledem k periodě PWM topení a dopravnímu zpoždění je odchylka, která je tímto způsobena, zanedbatelná. Kvůli možným nepřesnostem časovače jsem zvolil vyhodnocení dosažení doby k přepnutí na další položku z rozdílu aktuálního času počítače a uloženého času začátku aktuální části. Program pracuje tak, že uvažuje i drobná překročení této doby a při konstrukci hodinového plánu tento bude trvat hodinu s maximální odchylkou $+1\text{s}$, pokud se bude opakovat 5 krát, potrvá 5 hodin se stejnou maximální odchylkou, tedy

+1s. Časy jsou samozřejmě vztaženy k hodinám počítače, které však díky pravidelným synchronizacím a generátoru hodinových pulsů s minimální chybou dosahují vysoké přesnosti.

Dodržování aktuálních částí plánu aplikace zvládá stejně, jako by byly spouštěny samostatně, což je přesně chování, které se očekává. V grafu na Obr. 4.2 vidíme postup, kdy byl spuštěn opakovaně plánovač s následujícími položkami:

1. Soak, 21°C, 30 min.
2. Drift, -20°C/hod, 30 min.
3. Drift, +20°C/hod, 50 min.

Jak je vidět, chová se plánovač korektně, na začátku vidíme zákmit měřené teploty, způsobený spouštěním kompresoru. Následně je v komoře držena hodnota 21°C s aktuální maximální odchylkou 0,05°C. Poté se teplota postupně snižuje až na 11°C, kdy se změni směr a teplota vystoupá na 27,8°C. Při lineární změně byla maximální odchylka 0,4°C.



Obr. 4.2: Vývoj hodnot při použití plánovače

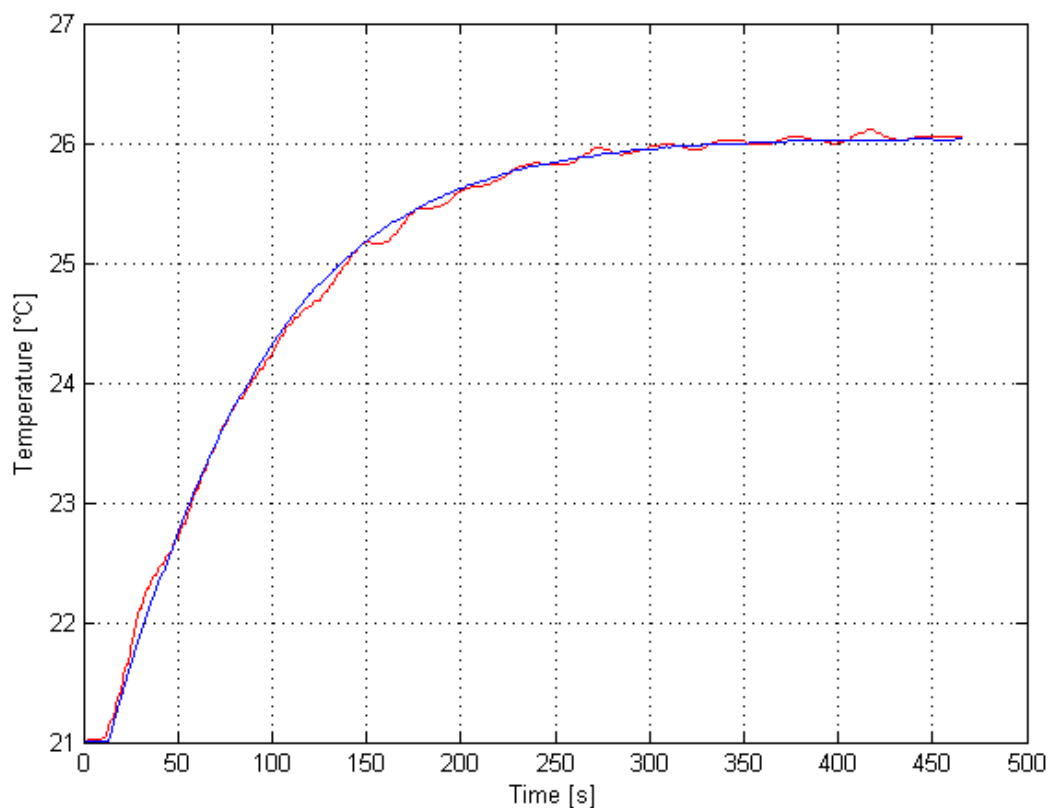
5 POSOUZENÍ PŘESNOSTI A DYNAMIKY KOMORY

Pro testy jsou velmi důležité parametry přesnosti dodržení žádané teploty, přechodové děje a výsledný rozkmit. Dále je vhodné také vymezit chladicí a topné schopnosti komory při použití regulátoru v aplikaci.

5.1 Odezva na skok žádané hodnoty

Při skoku o 5°C byla naměřena doba k dosažení nové teploty 5 minut. Překmit v tomto měření nabyl $0,11^{\circ}\text{C}$ a ustálený rozkmit byl $0,16^{\circ}\text{C}$. Nejvyšší odchylka po ustálení v tomto měření tedy splňuje maximální povolenou odchylku $0,1^{\circ}\text{C}$.

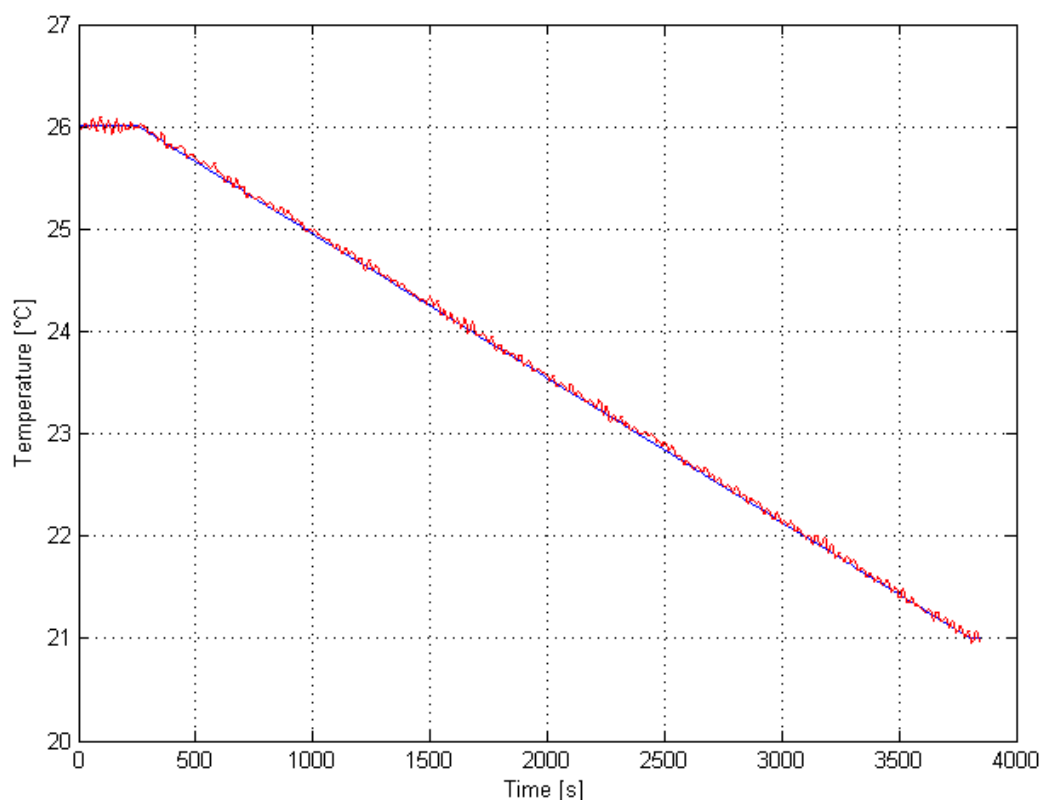
Přechodový děj při Offsetu $+5^{\circ}\text{C}$ můžeme pozorovat v grafu na Obr. 5.1, kde je tentýž děj simulován modelem dle kapitoly 2.5.



Obr. 5.1: Srovnání měření a simulace při skoku o 5°C (modrá simulace, červená měřené hodnoty)

5.2 Odezva na lineární změnu žádané hodnoty

Uvážím-li nejvyšší rychlost, kterou lze v programu nastavit ($20^{\circ}\text{C}/\text{hod}$), komora sleduje žádanou veličinu s odstupem $0,4^{\circ}\text{C}$ (graf v Obr. 4.2). Tato rychlost je však v aplikaci pouze pro rezervu, pro většinu testovacích procedur totiž stačí rychlost $10^{\circ}\text{C}/\text{hod}$. Uvedená odchylka však také dostačuje k testování. V následujícím grafu (Obr. 5.2) vidíme postupný pokles o $5^{\circ}\text{C}/\text{hod}$, kdy maximální odchylka dosahovala $0,11^{\circ}\text{C}$. Skutečná hodnota osciluje okolo žádané hodnoty, stejně jako při držení konstantní hodnoty.

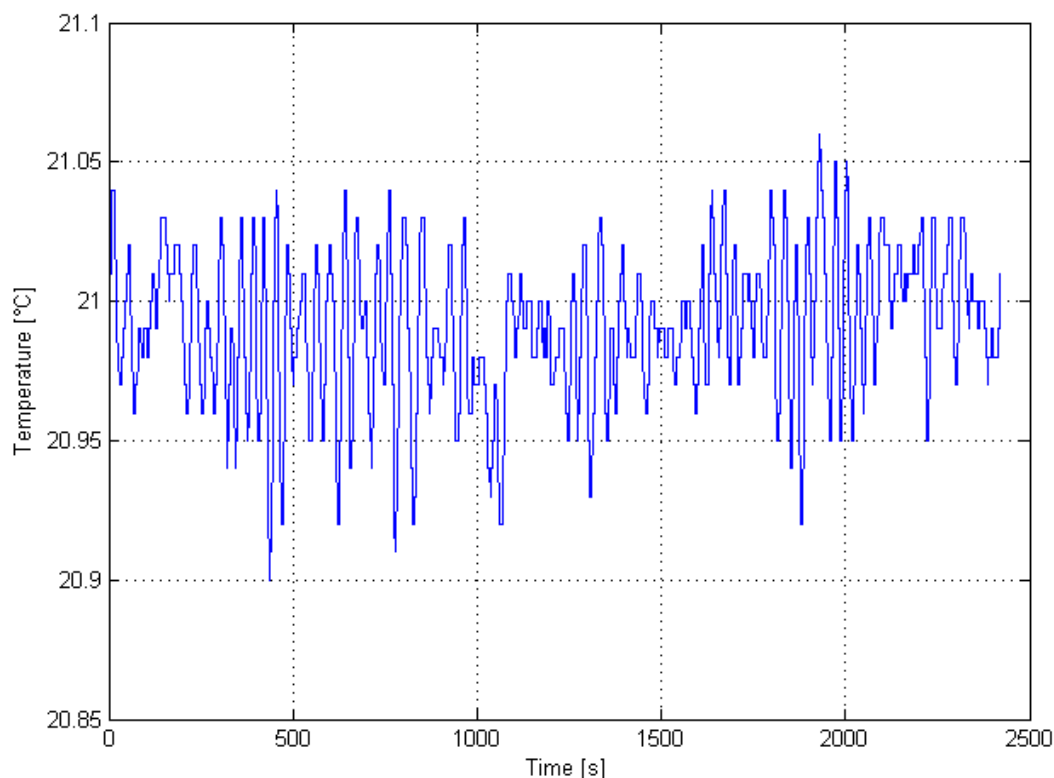


Obr. 5.2: Žádaná (modrá) a měřená (červená) teplota při lineárním sestupu o $5^{\circ}\text{C}/\text{hod}$

5.3 Odezva na poruchu v systému

K navození poruchy jsem dočasně zvýšil teplotu v laboratoři z 21°C na 26°C a odstavil jsem odsávání od komory, čímž jsem snížil účinnost chladicího systému komory.

Teplota v okolí může stoupnout poruchou chladicího systému nebo provozem dalších komor v laboratoři. Teplota v laboratoři dosáhla 26°C po 15 minutách. Průběh teploty v komoře můžeme pozorovat v grafu na Obr. 5.3, kde vidíme průběh teploty uvnitř komory. Porucha začala působit v čase 0, mírně snížila teplotu a následně teplota vrátila do původních hodnot. Pro testování byla odchylka způsobená poruchou zanedbatelná.

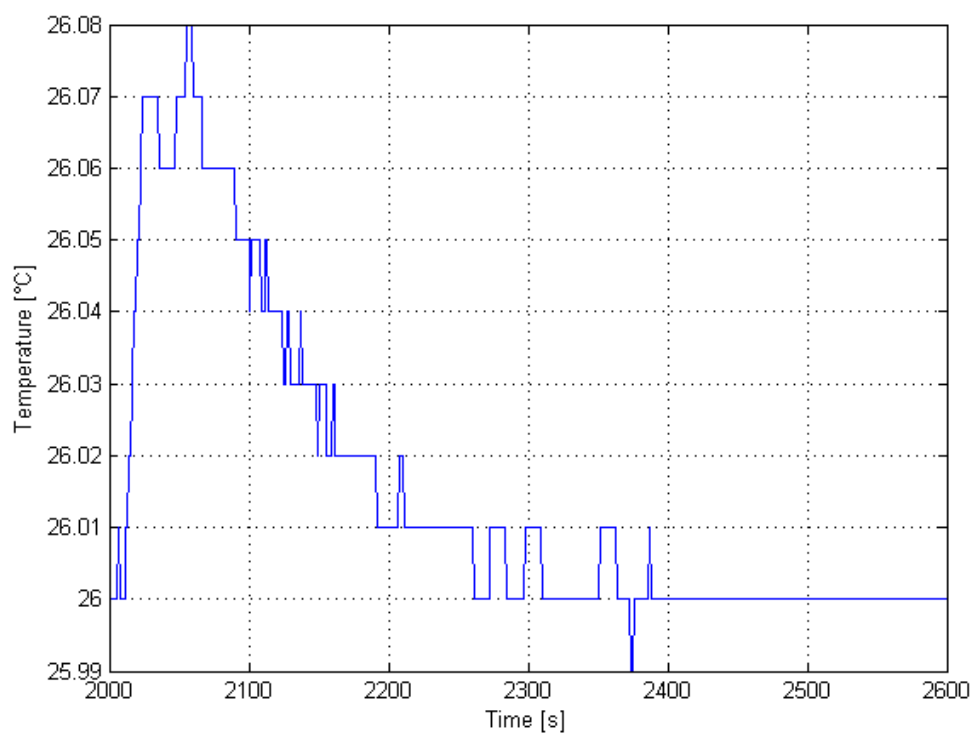


Obr. 5.3: Odezva teploty v komoře na poruchu

V simulaci jsem poruchu navodil změnou účinnosti chladicího systému a dosáhl tak většího překmitu než v reálných podmínkách, nicméně pro zhodnocení odezvy na poruchu je to však lepší. Vidíme zde tedy výrazné zvýšení teploty způsobené snížením účinnosti chlazení, které započalo v čase 2000 s. Žádaná hodnota zde byla 21°C a poruchu se podařilo vyregulovat za 6,5 minut. Graf se nachází na Obr. 5.4.

5.4 Celková dynamika komory

Komora dokáže změnit svou teplotu skokově o 5°C za 5 minut a dokáže konstantně měnit teplotu až o $20^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ v rozsahu $12\text{--}35^{\circ}\text{C}$. Mimo tento rozsah již naráží regulátor na omezení saturací akčního zásahu. Pro praktické použití tyto parametry



Obr. 5.4: Odezva modelu na poruchu

dostačují. Odchyľky od řádané hodnoty s použitím navrženého regulátoru se nacházejí v přijatelných mezích stanovených požadavky na testování.

6 ZÁVĚR

V prvních kapitolách bylo popsáno laboratorní vybavení, vlastnosti komory, nežádoucí vlivy a úskalí, která toto HW řešení provázejí. Byla také vysvětlena nutnost neustálého chlazení v okruhu, jakožto kompenzace samovolného ohřevu. Také byly předloženy potřebné testovací postupy pro pochopení funkcí programu a komory.

V systému se vyskytuje nepřesnost při měření teploty rušením a použitím jediného snímače, přestože v komoře jsou už z výroby osazeny dva. Pro lepší měření proto aplikace měřenou teplotu filtruje a může použít i druhý snímač, pokud je tento zkalibrovaný a v programu povolen.

Nový SW dokáže regulovat teplotu dle základních testovacích postupů (držení teploty, lineární změna a řízení termostatem) s přípustnými odchylkami. V novém SW je také implementován variabilní regulátor s parametry dle uživatelského nastavení, měnitelnými během testu. Aplikace v současné podobě splňuje všechny požadavky na průběh testování různých zařízení. Uživatelské prostředí je přívětivé a vcelku intuitivní.

Aplikace ukládá parametry regulátoru pro jednotlivé komory do konfiguračního souboru. Během testu se standardně ukládají měřená data pro vyhodnocení testování do souboru CSV. Plánovač lze uložit do souboru XML a později jej načíst pro rychlejší spouštění často užívaných procedur.

Výsledná přesnost a dynamika systému splňuje požadavky dané testovacími procedurami. Vzhledem k velmi malým reálným poruchám nedochází k výrazným odchylkám při působení poruch.

LITERATURA

- [1] SLOVÁK, T.: *Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik*. Katedra automatizační techniky a řízení: Učební texty [online]. 2002 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm.
- [2] PIVOŇKA, P.: Číslicová řídicí technika. VUT v Brně, skriptum, 111s, 2013
- [3] HVAC Systems: How They Work. *EDC: The official magazine for the LEED® professional* [online]. 2000 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.edcmag.com/articles/92110-hvac-systems-how-they-work>
- [4] BLAHA, P., VAVŘÍN, P.: *Řízení a regulace*, FEKT VUT Brno, skriptum, 2009
- [5] HONEYWELL, *Průvodní technická dokumentace k projektům 701133/711043 (Thermal Chamber Replacement)*, interní dokument
- [6] Nickel Chrome Alloys. *AZO Materials* [online]. 2001, 2013 [cit. 2014-12-23]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=916>
- [7] Industrial .NET - PID Controllers. BEYER, Ron. *Code Project* [online]. 2009 [cit. 2015-01-09]. Dostupné z: <http://www.codeproject.com/Articles/49548/Industrial-NET-PID-Controllers>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning, neboli systémy pro vytápění, větrání a klimatizaci
SW	software, zde myšlena aplikace v počítači, pokud není uvedeno jinak
HW	hardware, fyzické komponenty počítače a komory
Wi-Fi	bezdrátová síť standardu IEEE 802.11 a/b/g/n
PC	osobní počítač

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD

43

A OBSAH PŘÍLOŽENÉHO CD

Na přiloženém CD nalezneme elektronickou verzi práce.

Dále je zde v adresáři aplikace výsledný SW pro ovládání teplotních komor včetně zdrojových kódů. Aplikace je napsána v prostředí Visual Studio Express 2012 s využitím .NET Framework verze 4.

K vyzkoušení funkčnosti SW lze použít emulační program v adresáři emulator-komory, který je nutno připojit přes Null modem emulator v programu na tvorbu virtuálních COM portů, kterých je na internetu plno, proto jej nepřidávám na CD.

Pro lepší vizualizaci mé práce jsem do adresáře grafy umístil zejména 3D grafy generované v průběhu práce. Výhodou je při prohlížení možnost otáčet grafem dle potřeby. Grafy jsou uloženy ve formátu .fig a otevírají se v prostředí Matlab.

Složka matlab-model ukrývá vše potřebné k reprodukci počítačové simulace komory v prostředí Matlab-Simulink. Doporučuji spustit nejprve skript init_modelu.m, který zajistí načtení soustavy a parametrů regulátoru. Poté již v prostředí Simulinku, které skript spustí, stačí otevřít model_rizeni.slx a provádět různé simulace.